

後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を用いた 地中鉄筋コンクリート構造物の耐震補強

福浦尚之¹・岡本 晋²・堀口賢一³・三桶達夫³・大友 健⁴・府川 徹⁵

¹正会員 博(工) 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 博(工) 成和リニューアルワークス(株) 工事統括部 (〒160-0023東京都新宿区西新宿一丁目8番1号)

³正会員 工修 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051横浜市戸塚区名瀬町344-1)

⁴正会員 Ph.D. 大成建設(株) 土木本部プロジェクト部 (〒163-0606東京都新宿区西新宿一丁目25番1号)

⁵正会員 工修 成和リニューアルワークス(株) 工事統括部 (〒160-0023東京都新宿区西新宿一丁目8番1号)

Post-Head-barは、片端に矩形プレート、もう一方の片端に小型の丸形プレートをそれぞれ摩擦圧接したせん断補強鉄筋である。このPost-Head-barを用いることで、下水道施設などのように背面が地盤に接しており構造物の内側からしか補強工事を実施できないなど、施工上の制約が大きい鉄筋コンクリート構造物のせん断補強を効果的に行うことができる。本補強工法の特徴は、①内空側から施工できるため地山の掘削コストが不要、②補強部材（鋼材）がコンクリート内部に埋設され特別な維持管理が不要、③せん断補強に伴う内空断面の減少がなく例えば車両の建築限界を侵さない、④比較的短工期で補強が可能な点である。本報告は、Post-Head-bar工法について、補強設計の考え方、施工方法および適用実績を述べるものである。

Key Words：Post-Head-bar工法、耐震補強、せん断補強、地中構造物

1. はじめに

1980年以前の土木学会コンクリート標準示方書によって設計された構造物では、コンクリートの許容応力度を大きく見積もっていたため、せん断補強鉄筋量が少ない。そのため、当時の設計では曲げ破壊モードとなるはずが、実際にはせん断破壊モードとなるものが相当数存在する。さらに、1995年兵庫県南部地震以前の旧耐震設計法によって設計され現在供用されている鉄筋コンクリート構造物においても、レベル2地震動が作用した場合に部材のせん断耐力が不足することが懸念されている。

このような背景のもと、既設の鉄筋コンクリート構造物に対して、早急に耐震補強を進めることが喫緊の課題となっていた。

一方、2005年に中央防災会議で東海地震および東南海・南海地震に対する「地震防災戦略」が策定され¹⁾、これを受けて2006年度に「下水道地震対策緊急整備事業」が定められた²⁾。

しかし、図-1に示す下水道施設などのように、背面が地盤に接する供用中の地下または半地下構造物などでは、構造物の内側からしか補強工事を実施できない。このような施工上の制約などを受けながらも、耐震補強、特にせん断補強を行うことができる工法の開発が課題となっていた。

後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-



図-1 地下・半地下構造物の耐震補強

bar)^{3)～9)}は、これらの課題を解決した、既設鉄筋コンクリート構造物のせん断耐力を向上させる耐震補強技術である。

本報告は、Post-Head-bar工法について、補強設計の考え方、施工方法および適用実績を述べるものである。

2. Post-Head-bar工法

(1) Post-Head-bar工法の概要

Post-Head-bar工法とは、“プレート定着型せん断補強鉄筋(Head-bar)”を後施工により既設の鉄筋コンクリート構造物に設置するせん断（耐震）補強工法である。

Post-Head-barは、写真-1に示すように、内空側に矩形プレートを地山側に小型の丸形プレートをそれぞれ摩擦

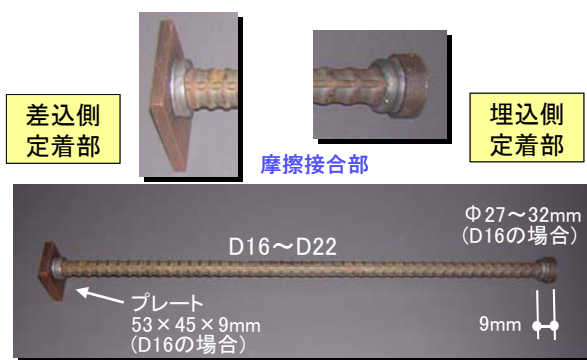


写真-1 Post-Head-bar

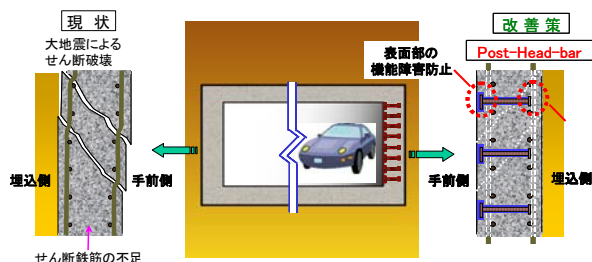


図-2 Post-Head-barによるせん断補強

圧接したものであり、供用中の構造物に削孔した孔内にモルタルを充てんし、Post-Head-barを差し込み、モルタル充てん材により固定することで構造躯体と一体化させる工法である。したがって、背面に地盤などがある供用中の既設構造物に対して、構造物の片側（内空側）からの施工が可能なものである。（図-2）

Post-Head-barは、いわゆるトラス理論における引張材の役割を果たす補強鉄筋であり、部材に作用するせん断力に対して抵抗する。Post-Head-barの両端のプレートは、寸切り鉄筋に比べて孔内での定着性能を増大させる効果を持ち、これによりせん断補強効果が増大する。また、内空側の矩形プレートはPost-Head-barを削孔の中心かつ水平に配置するためのスペーサとなる役割も果たしている。

なお、Post-Head-bar自体はすべて構造物内に埋設され、所定のかぶりを確保することができることから、腐食等に対する耐久性も確保できる。

Post-Head-bar工法は、表-1に示すような制約条件下においてその効果を発揮するが、主に、以下の3項目を満たす場合に使用される。

- ①既設の鉄筋コンクリート構造物の後施工によるせん断補強の目的で用いる。
- ②既存構造物の片側面からの補強施工に適用する。
- ③地震時の応答変位量が限定される土中構造物などの補強に主に適用する。

(2) 補強設計手法

a) せん断補強効果の検証実験

図-3に示すはり状試験体の2点支持・2点载荷の静的正負

表-1 Post-Head-bar 工法の特徴

制約条件	Post-Head-bar の特徴
・短工期	① 供用休止期間が短いこと
・低コスト化	② 高価な背面地盤の掘削コストが不要なこと
・粉塵の低減	③ 第三者・作業員の健康と周辺環境への影響が少ないこと
・特別な維持管理の不要	④ 維持管理コストの抑制と維持管理による供用休止期間の減少
・施工空間の制限	⑤ 間仕切り壁・既存設備等による空間的制約を受けにくいこと
・資機材の軽量化・小型化	⑥ 資機材搬入経路が通路・人孔・歩道の制約を受けにくいこと
・移動・移転の不要	⑦ 既設の機械・設備等の移設を回避できること
・内空空間の確保	⑧ せん断補強により建築限界の制約が増加しないこと
・設計におけるせん断余裕の制約	⑨ 曲げ耐力を増すことなくせん断耐力だけを増加させること

交番载荷実験によって、RC壁にPost-Head-barを適用した場合の地震時の面外せん断力に対する補強効果を検証した³⁾。

試験体は全長4.1m、スパン3.6mで、図中のせん断区間にD16のPost-Head-barを横断面内に2本ずつ長手方向に200mm間隔で設置するケースと、せん断補強を行わないケースを実施した。

図-4に両ケースの荷重－変位関係を、表-2にコンクリートとせん断補強鉄筋の実験耐力と設計耐力を比較して示す。このうち、設計耐力はコンクリートと鉄筋の実強度を用いて2002年制定コンクリート標準示方書構造性能照査編によって算出した。

検証実験の結果、Post-Head-bar工法にて補強した場合のせん断耐力は補強なしの場合よりも十分に大きく、Post-Head-barによる補強効果を確認した。また、Post-Head-barによる補強耐力 ($V_{awd, exp}$) は、Post-Head-barと同一断面のせん断補強鉄筋を予め配置した場合 ($V_{awd, design}$) の90%以上の耐力であり、十分な補強効果を有することが確かめられた。

せん断補強の効果を定式化するために、Post-Head-barが通常の半円フック形状のせん断補強鉄筋と比して分担可能なせん断耐力の有効係数 β_{aw} を算定した。Post-Head-barが伝達できる応力分布は、既往の評価方法¹⁰⁾ の考え方にに基づき図-5に示すような分布となる。Post-Head-barの矩形プレート側においては、せん断補強鉄筋材端まで定着が十分確保されている。これに対し、Post-Head-barの円形プレート側では、定着長 l_y と斜めひび割れからせん断補強鉄筋材端までの長さ l との関係により伝達可能な応力が変化する。

これより、有効係数 β_{aw} は図-5に示す伝達応力分布の

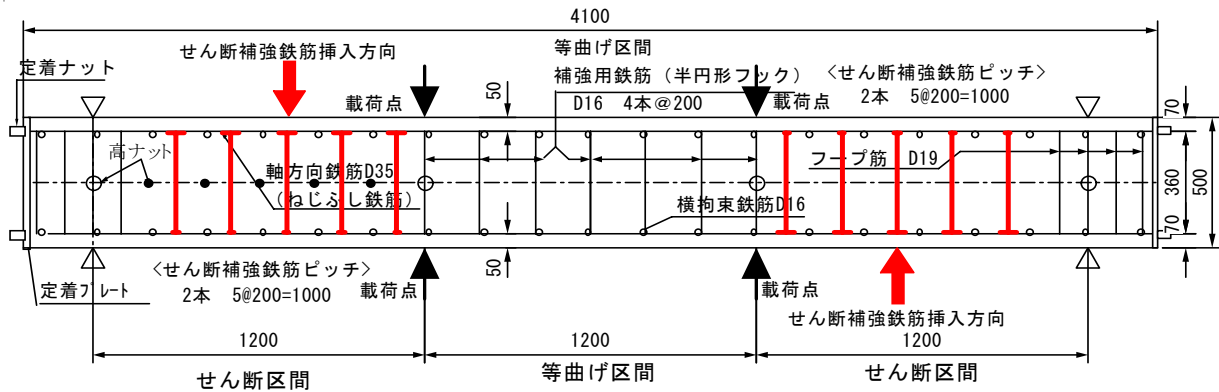
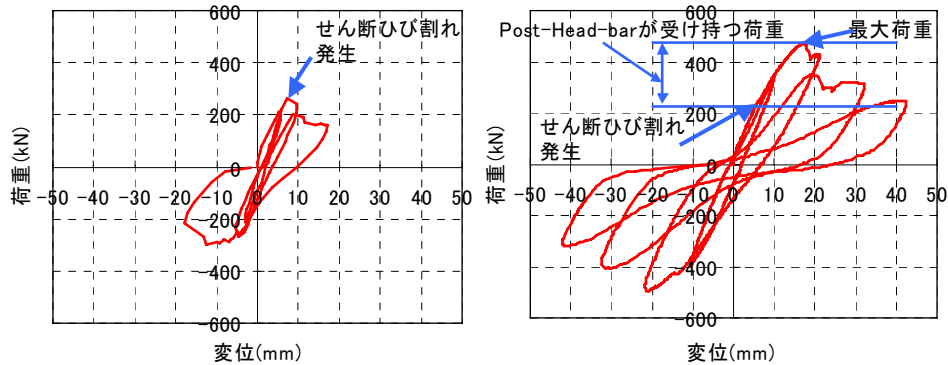


図-3 Post-Head-bar によるせん断補強梁の荷重実験



(a) せん断補強なし (b) Post-Head-bar による補強

図-4 実験結果 (各ケースの荷重-変位関係)

表-2 実験結果と有効係数

実験ケース	せん断耐力 (kN)						実験結果から評価 した有効係数 (Vawd,exp/Vawd,design)
	V		Vcd		Vawd		
	実験結果 (exp)	設計結果 (design)	実験結果 (exp)	設計結果 (design)	実験結果 (exp)	設計結果 (design)	
補強なし	261	241	261	241	0	0	-
Post-Head-bar による補強	486	516	225	230	261	286	0.91

V: コンクリートとPost-Head-barの耐力の合計 ($V_{cd}+V_{awd}$)

V_{cd}: コンクリートの耐力

【実験ではせん断ひび割れが最初に発見されたせん断力】

V_{awd}: せん断補強鉄筋 (Post-Head-bar) の耐力

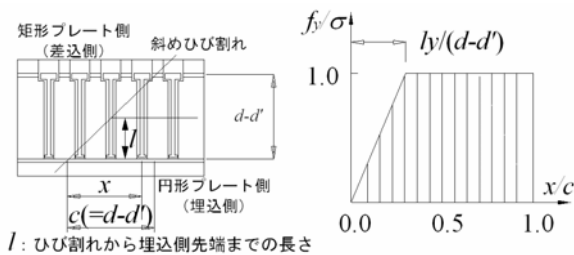


図-5 斜めひび割れ内のPost-Head-barの応力分布

面積として、式(1)により算出することができる。なお、円形プレート側の定着長 l_y は、実験に基づき5D (D:鉄筋径)と定めた³⁾。

$$\beta_{aw} = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \quad (1)$$

ここに、 $d-d'$: 圧縮鉄筋と引張鉄筋間の距離

ただし、 $d-d' > l_y$

実験条件での有効係数 β_{aw} の算定値は0.89となり、実験結果に基づく有効係数は、算定値を上回っている。

これより、式(1)に基づく有効係数の算定方法は妥当といえる。ただし、補強設計にあたっては、適用部材厚毎に有効係数を変化させることはせず、有効係数0.8に対応する各鉄筋径毎の部材厚を適用最小部材厚とし、Post-Head-barが分担できるせん断力の有効係数を下限値の0.8とすることで補強設計の簡略化を図った。

また、Post-Head-barによるせん断補強後の曲げ変形性能に関してもRC壁部材の正負交番荷重実験を行い、通常の半円形フック型のせん断補強鉄筋により補強された部材の主鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性率が確保されることが確認されている³⁾。

b) Post-Head-barによるせん断耐力の評価方法

Post-Head-barにより補強された壁部材の単位長さ当り

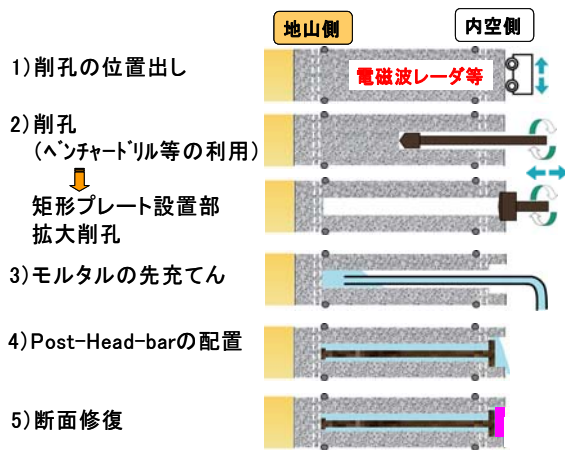


図-6 施工手順

のせん断耐力は、式(2)により算出される。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{phb} \quad (2)$$

ここに、 V_{cd} : コンクリートによる受け持たれるせん断耐力

V_{sd} : 既存のせん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力

V_{phb} : Post-head-barにより受け持たれるせん断耐力

Post-Head-barにより受け持たれるせん断耐力 (V_{phb}) は式(3)にて評価する。

$$V_{pyd} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = 0.8 \cdot V_{awd} \quad (3)$$

ここに、 β_{aw} : Post-head-barのせん断耐力向上への有効係数(= 0.8)

V_{awd} : Post-head-barを通常のせん断補強鋼材とみなした場合に受け持つせん断耐力

また、Post-Head-barの適用範囲を以下に示す。

- ・Post-Head-barの材質: SD295またはSD345
- ・Post-Head-barの鉄筋径: D16, D19, D22
- ・必要最小部材厚: D16→300mm, D19→350mm, D22→400mm

(3) 施工方法

図-6にPost-Head-barの施工手順を示す。

手順1: 削孔の位置出し

電磁波レーダなどを使用し、写真-2に示すように内空側の主鉄筋・配力鉄筋を避けた場所にPost-Head-bar設置用の削孔位置を定める。

手順2: 削孔

Post-Head-barを地山側主鉄筋位置まで挿入するための削孔を行い、続いて、内空側の矩形プレートが設置される部分の拡大削孔を行う。

削孔は、施工面での効率を考慮して、写真-3に示すベンチャードリルにより行うことを標準とする。

削孔にベンチャードリルを用いる利点として以下

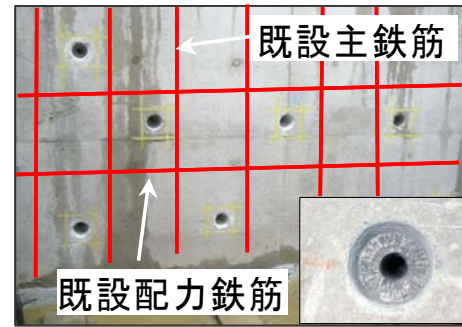


写真-2 削孔位置および削孔状況



写真-3 削孔機械 (ベンチャードリル)



写真-4 下向き施工状況



写真-5 狭隘部の施工状況

の6点があげられる。

- ①切削ではないので鉄筋を切断しない。
- ②削孔に水を使用しない。
- ③集塵機使用により削孔中の粉塵発生を極力抑えることが可能。
- ④制御部が軽量小型であり人力による取扱いが容易。
- ⑤ロッド長を短くすることにより狭い空間での施工が可能。
- ⑥削孔速度が速い。



写真-6 手押しポンプによるモルタル充てん



写真-7 Post-Head-bar の挿入



写真-8 断面修復

表-3 Post-Head-bar 工法の適用実績

2009年12月現在				
対象施設	施工件数	対象部材	Post-Head-barの鉄筋径	
道路	空港7ヶ所地下道他	2件	壁	D16, D19, D22
浄化センター	最終沈殿池他	19件	壁、床版はり	D16, D19, D22
ポンプ場	ポンプ室他	14件	壁、床版はり	D16, D19, D22
鉄道	地下駅舎等	4件	壁	D16, D22
浄水場	配水池他	2件	壁、床版	D16
水門	津波対策用防潮水門他	2件	壁、床版	D22

施工中案件を含む 合計：43件 65,000本以上

なお、下向き削孔の場合は、たとえば写真-4のようにベンチャードリルを設置して施工することが可能である。また、上向き施工と狭隘部の施工については、写真-5のような特殊コアドリルを用いて削孔する。

手順3：モルタルの先充てんとPost-Head-barの配置

削孔後、孔内清掃を行うとともに孔内湿潤を行う。孔内清掃・湿潤後、写真-6に示す手押しポンプのホースの先端からPHbモルタルを削孔内に完全に充てんする。

その後、写真-7に示すようにPost-Head-barを挿入し余分に漏れたモルタルを除去することにより、Post-Head-barの設置を完了する。PHbモルタルは、Post-Head-bar専用開発されたプレミックス材料である。施工現場では、所定量の水に投入し混練することにより所定の性能を発揮することができる。

手順4：断面修復

最後に、写真-8に示すように、断面修復材によって、拡大削孔部の充てん復旧を行う。断面修復材もプレミックス材料であり、施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。

3. Post-Head-bar工法の適用

(1) これまでの適用実績

Post-Head-barを用いたせん断補強工法は、2007年浄化センターの地下構造物の壁・床版に適用したのを皮切り

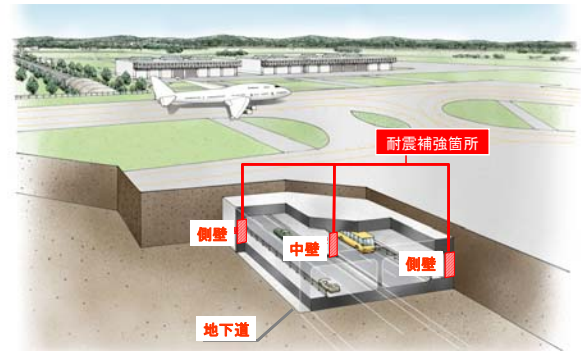


図-7 耐震補強箇所
(新千歳空港アクセス地下道)

に、2009年12月までに表-3に示す43件の工事に適用されている。施工本数は、施工中のものを含めて合計65,000本以上であり、せん断補強の要求の高まりに呼応して、その実績も増大している。

施工実績の内訳を見ると、下水処理場関連施設（浄化センター・ポンプ場）が施工件数の7割以上を占めている。その他、浄水場、水門、道路トンネル、鉄道地下駅舎部などに適用されている。これらの実績の部材厚さは400mm～1,800mmであり、津波対策用防潮水門では部材厚さ3,000mmの実績も有している。

(2) Post-Head-bar工法による補強実施の選定例

a) 補強対象構造物と耐震補強箇所

補強対象構造物は、全長326m、全幅24mの上下2車線を有するボックスカルバートで、図-7に示すように側壁（標準部：1000mm）と中壁（標準部：800mm）の補強を国土交通省北海道開発局が実施した^{11), 12)}。

b) 制約条件

対象箇所の補強に際して考慮すべき制約条件として、①地震直後の機能維持、②道路車線数の確保、③空港機能の維持があった。

①地震直後の機能維持

この地下道は大地震が襲来しても3日以内に復旧する必要がある施設と位置付けられており、たとえ被害が発生しても、軽微な補修程度で復旧できることが必要である。

②補強完了後の道路車線数の確保

この地下道は新千歳空港と国道36号線を介して道央自動車道とを結ぶ重要な道路で、通行量も多いため、耐震補強後の道路車線数の確保が必要である。

③空港機能の維持

この地下道は誘導路の直下を横切っているため、耐震補強工事実施中であってもトンネルの上部を通っている誘導路の機能を維持する必要がある。

c) 補強工法の選定

地下構造物のせん断耐力補強を目的とした耐震対策工法案として、空港制限域内の施工の実現可能性等も考慮して、以下3ケースについて検討した。

I：地盤改良による方法（薬液注入）

周辺地盤の強度を高めて地盤の変形による部材への影響を小さくすることで、部材応答値が小さくなることを期待した方法。

II：部材厚を厚くする方法（中壁・側壁の増厚補強）

中壁・側壁がせん断破壊している原因の一つに部材が曲げ変形することによってせん断力が発生することが確認されているので、中壁・側壁の剛性を高めるのと同時にせん断耐力を向上させることを期待した方法。

III：部材のせん断耐力を高める方法

補強対象の地下道は施工年次が古いため、当時の設計基準に基づき、中壁・側壁に構造細目上の最小鉄筋は存在するものの、スターラップとしては配置されていない。これが、現設計の地震時におけるせん断耐力が不足する原因となっている。よって、せん断補強鉄筋（スターラップ）を新たに配置することでせん断耐力を向上させる方法。

検討の結果、補強工法Ⅰでは部材応答値が小さくなるが構造物自体のせん断耐力が確保できず制約条件①地震直後の機能が必ずしも維持できないことがわかった。また、補強工法Ⅱでは建築限界を阻害しなければせん断耐力を確保できず制約条件②補強完了後の道路車線数が確保できなかった。そこで、補強工法Ⅲ、部材のせん断耐力を高める方法を適用することにより、制約条件①～③を満たすことが可能であることから、この方法が最適と判断された。部材のせん断耐力を高める方法の内、事後の補強対策としての施工性に優れており、実績・経済性等も含めて優位性のあるPost-Head-bar工法が採用された。写真-9に施工完了時の状況を示す。

4. まとめ

Post-Head-barは、これまで補強が困難とされていた既設鉄筋コンクリート構造物を後施工で比較的簡便にせん断補強することが可能で、その耐震性能を確実に向上させることができる工法である。

本工法は平成17年に建設技術審査証明³⁾を取得して

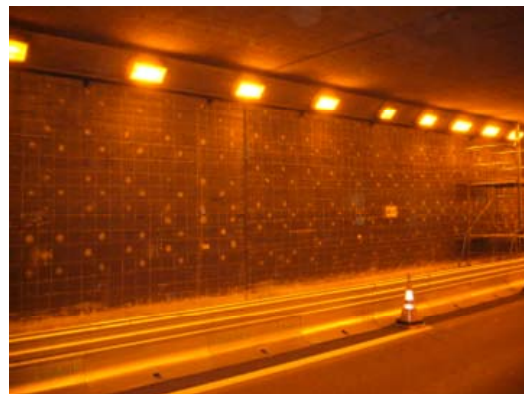


写真-9 施工完了時の状況

から既に多数の施工実績があり、平成21年12月までに43件の工事に適用されており、施工中のものを含めて合計65,000本以上の実績がある。

今後とも、本工法を積極的に提案・施工していくことにより、浄化センター、浄水場、水門、道路、鉄道などの地震時の安全が高まり、ひいては地震に強い国土の形成に貢献していくことができると考えている。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議専門調査会：地震防災戦略（定量的な減災目標と具体的な実現方策を定める計画）、http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_toukai/pdf/senryaku/honbun.pdf, 2005..
- 2) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、（社）日本下水道協会：下水道地震対策緊急整備計画策定の手引き（案）,2006.4.
- 3) 土木研究センター：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」、建設技術審査証明報告書, 2005.12.
- 4) 国交省 NETIS(New Technology Information System)：KT090022-A、技術名称「Post-Head-bar 工法」
- 5) 土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋、「Head-bar」、建設技術審査証明報告書, 2004.9.
- 6) 三桶達夫, 堀口賢一, 大友健, 加納宏一, 田中良弘：既設コンクリート構造物のせん断補強工法の開発, 大成建設技術センター報, 第39号, 2006.
- 7) 田中良弘, 大友健, 三桶達夫, 堀口賢一：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋によるRC地下構造物の耐震補強工法の開発, コンクリート工学, Vol45, No.3, pp.30-37, 2007.
- 8) 三桶達夫, 堀口賢一, 岡本晋：既設コンクリート構造物のせん断補強工法の開発, 電力土木, pp.62-66, 2007.
- 9) 岡本晋, 三桶達夫, 堀口賢一, 府川徹, 中條基, 加納宏一：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋による耐震補強工法の開発 Post-Head-bar によるせん断補強効果, 大成建設技術センター報, 第40号, 2007.
- 10) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, コンクリートライブラリー第124号, 2005.
- 11) 加藤幸輝, 青井晃樹：新千歳空港における土木施設の耐震対策について, 第9回空港技術報告会, 2008.12.
- 12) 加藤幸輝, 佐々木卓哉, 佐藤明彦：地下道における PHb（ポストヘッドバー）工法の採用と積雪寒冷地の施工について, 第53回北海道開発技術研究発表会, 2010.2

(2010.7.23受付)